

Imitation du mouvement humain pour les robots humanoïdes

Application au robot HRP-2

L. BOUTIN, A. EON, S. ZEGHLOUL, P. LACOUTURE

*Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers, UMR6610
Université de Poitiers, CNRS, SP2MI, Bd Marie et Pierre Curie
BP 30179, 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL CEDEX, France*

Résumé :

Le travail présenté concerne une méthode permettant aux robots humanoïdes d'imiter un mouvement de marche humaine enregistré par un système de "Motion Capture". Le processus est applicable à l'ensemble des humanoïdes. La méthode est valable quel que soient les longueurs et les répartitions de masses des robots. Elle permet de générer des allures proches de celles du sujet humain tout en assurant la stabilité du robot et des contacts réalisables au niveau du sol. Une application sur le robot humanoïde HRP-2 est présentée.

Abstract :

A method to generate humanoid gaits imitating a human locomotion pattern recorded by a motion capture system is presented. The method developed can easily be used for human-like robots of different sizes, masses and structures. The resulting walking motion of the robot is pretty close to the human gait, while respecting a feasible contact with the ground and the robot balance. The procedure has been tested on the robot HRP-2.

Mots clefs : robot humanoïde / génération de trajectoires / locomotion / bipède / motion capture

1 Introduction

Depuis quelques années le nombre de robots anthropomorphes augmentent rapidement, la génération de trajectoires pour ces plateformes de recherche devient ainsi un sujet de recherche d'un fort intérêt. Des méthodes robustes de génération de trajectoires de marche ont été développées permettant de faire évoluer les robots humanoïdes dans un environnement donné avec des démarches dynamiques. Pour notre part, nous proposons de développer une méthode qui permet non seulement de générer des allures de marche dynamiquement stables, mais surtout d'imiter une allure de marche humaine. La procédure de transposition développée s'appuie sur l'expérience de trois domaines de recherche : La communauté de la biomécanique humaine [1], l'animation de personnages virtuels [2] et enfin la robotique humanoïde [3]. Tout d'abord la procédure de capture du mouvement humain en trois dimensions sera présentée avec quelques résultats. Ensuite la méthode de transposition sera décrite, celle-ci permet de créer les trajectoires imitant le mouvement humain. Finalement l'application sur le robot HRP-2 (AIST, Kawada Industries, Inc®) sera développée. La stabilité du mouvement est validée par l'utilisation du logiciel de simulation OPENHRP.

2 Le mouvement humain

2.1 Motion capture

Pour enregistrer les données du mouvement humain, le système de "motion capture", SAGA3RT de la société Biogesta® (Valenciennes, France) a été utilisé avec six caméras infrarouge cadencée à 50Hz. Le volume d'étude calibré est de 3m de long, 1m80 de haut et 1m de large. Deux plateformes de force ont permis d'enregistrer les six composantes des efforts de contact des pieds sur le sol pendant deux phases de simple appui et une phase de double appui. Elles ont permis surtout de valider un algorithme de détection de contact des pieds sur le sol qui sera détaillé dans la partie 2.3. Trente sept marqueurs réfléchissants (Fig. 1) sont placés directement sur la peau du sujet qui réalise la marche à imiter. Une des problématiques des modèles biomécaniques du corps humain est la localisation des centres articulaires. Ici pour les chevilles, genoux, coudes et poignées, leurs centres articulaires sont à chaque fois considéré comme étant au milieu de leurs deux marqueurs internes et externes (méthode prédictive [4]). Pour les épaules et les hanches, une méthode dite fonctionnelle [5] a été utilisée. Le nombre de segments articulés considérés dans cette étude est de quinze (Figure 1). La tête et les mains sont associées respectivement au mouvement du thorax et des avant-bras. Les repères des différents segments sont définis suivant les recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB) [1].

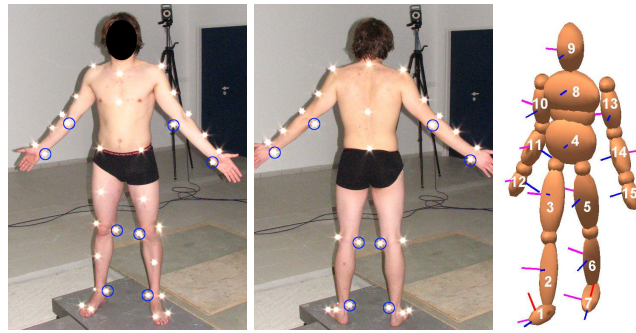


FIG. 1 – Set de marqueurs cinématiques et statiques (entourés) — Modèle segmentaire humain

2.2 Angles articulaires

Pour déterminer la position et l'orientation de chaque segment par rapport au repère terrestre, au moins trois marqueurs sont nécessaires. Ces trois marqueurs permettent de construire un repère orthonormé par segment. Les trois axes du repère ainsi défini forment la matrice de rotation du segment considéré par rapport au repère terrestre. A partir des matrices de rotation de chaque segment, les matrices de rotation intersegmentaires sont calculées. Celles-ci sont utilisées pour calculer les angles de flexion, abduction et rotation de chaque articulation.

2.3 Contacts initiaux et décollage des pieds

Après la détermination de l'orientation et de la position des segments ainsi que des angles intersegmentaires, la détection des contacts pieds/sol doit être réalisée. En effet pour générer le mouvement de locomotion pour le robot, il est nécessaire de définir une succession, au cours du temps, de phases de simple appui pied droit ou pied gauche et de phases de double appui. Le robot respectera, si possible, les proportions entre ces différentes phases. L'objectif est que simplement avec la cinématique des trois marqueurs de chaque pied, les événements de décollage de pied (TO) et de contact initial (IC) puissent être identifiés. Un nouvel algorithme de détection de contact appelé High Pass Algorithm (HPA) [6] a été étendu spécialement pour cette étude. Cet algorithme a été développé pour l'identification des événements de contact pieds/sol pour des marches en ligne droite, il est désormais étendu pour des allures de marches non rectilignes. Uniquement les positions des marqueurs de la malléole externe et du premier et dernier métatarse du pied ont été utilisés. La méthode standard de détermination est décrite par E. Desailly and al. [6], la principale modification est l'utilisation de la norme du déplacement horizontal et transversal et non simplement le déplacement suivant l'axe de marche.

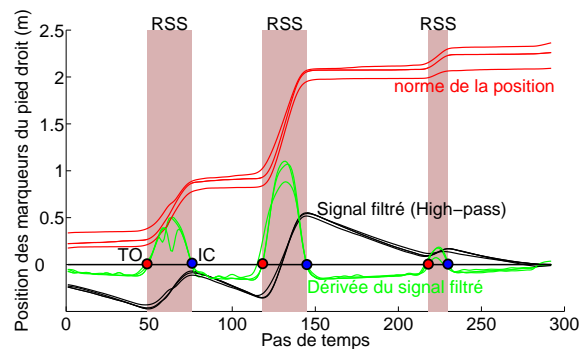


FIG. 2 – Calcul des évènements de contact pour le pied droit

Pour un mouvement de marche avec un départ arrêté et un retournement de 90° à la fin de l'avance du sujet, les fonctions caractéristiques permettant la détermination des événements du pied droit sont représentées sur la Figure 2. Les normes des déplacements des marqueurs des pieds sont représentées en rouge. La courbe noire correspond au signal filtré (passe-haut). Enfin la dérivée de ce signal permet aux instants des changements de signes de trouver les contacts initiaux et les décollages du pied. Les deux premiers IC et TO sont comparés avec les données plateformes. L'erreur est inférieure à 40ms. Sachant que l'intervalle d'échantillonnage du système de motion capture est de 20ms, cette erreur est acceptable pour notre application.

2.4 Trajectoires du CoM et du CoP

Deux plateformes de force ont été utilisées pour vérifier l'algorithme de détection de contact mais aussi pour analyser la trajectoire du centre de pression (CoP) au cours de la marche humaine (Figure 3). Il est intéressant d'observer sa trajectoire au cours de la marche humaine pour la comparer aux trajectoires de référence du CoP imposées aux robots humanoïdes pour assurer leur équilibre. Pendant la phase de simple appui, le CoP évolue le long de l'axe du pied en contact avec le sol. Il est positionné légèrement sur l'extérieur du pied puisqu'il suit la voûte plantaire. Ensuite pendant la phase de double appui, il progresse en ligne droite, de l'avant du pied arrière jusqu'au pied avant. Il est intéressant de voir que le CoP ne change pas de direction lorsqu'il passe du double appui au simple appui par contre il y a un changement assez brusque de direction à la fin du simple appui. Ce phénomène provient de l'orientation des pieds pendant la marche. Comme décrit dans la littérature [7], le centre de masse (CoM) calculé grâce aux tables anthropométriques, suit une courbe sinusoïdale avec une amplitude très faible comparée à la trajectoire du CoP. Cette marche est clairement dynamique puisqu'au début et à la fin des phases de simple appui le CoM n'est pas dans le polygone de sustentation qui est le pied dans ce cas. L'équilibre statique dans ce cas n'est pas respecté pendant ces phases.

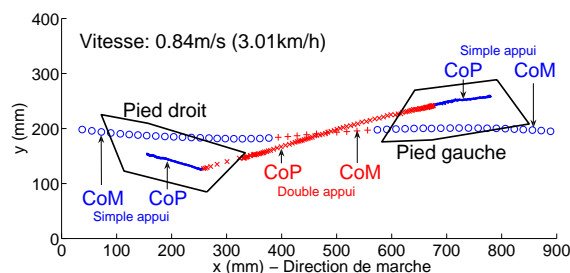


FIG. 3 – Evolution du centre de pression et du centre de masse du sujet humain pendant la marche

3 Transposition au robot

3.1 Principe

La méthode de transposition proposée permet de modifier les trajectoires des angles articulaires humains pour que le mouvement soit acceptable par le robot. Trois contraintes principales sont à respecter. La première est le contrôle de la trajectoire des pieds pour que ceux-ci répondent au critère de non pénétration avec le sol. Ensuite l'équilibre du robot doit être respecté à tout instant du mouvement. Et enfin, l'auto-collision, ainsi que les butées articulaires sont aussi des contraintes à respecter.

La procédure de transposition débute tout d'abord par la détermination des coordonnées articulaires humaines ainsi que des instants de contact et de décollage des pieds. On commande virtuellement le robot grâce à ces angles non corrigés (on les contraint tout de même à ne pas dépasser les butées articulaires). Il en résulte une trajectoire du robot complet dans le repère terrestre. C'est cette trajectoire qui permet de générer des trajectoires de référence des pieds et du CoP compatible avec les contraintes de contact au sol et de stabilité. Si le robot est plus petit que le sujet humain alors automatiquement avec cette procédure la taille des pas sera adaptée à sa morphologie. La fréquence de marche est a priori conservée (si elle n'est pas trop élevée).

3.2 Définition des levées de pied

La trajectoire des pieds est définie par sept phases (Figure 4, pied droit en balance).

- t_1 : Le talon gauche touche le sol
- t_1 - t_2 : Le pied gauche tourne autour de son talon
- t_2 - t_3 : Les deux pieds restent à plat
- t_3 - t_4 : Le pied droit tourne autour de son orteil
- t_4 : Décollage du pied droit, début du simple appui
- t_5 : Altitude maximum du talon
- t_6 : Altitude maximum des orteils
- t_7 : Contact du talon du pied droit

Un exemple des altitudes imposées aux talons et aux orteils est présenté Figure 4. Entre les différents instants t_i , les trajectoires sont définies avec des polynômes d'ordre 6 pour assurer la continuité des positions, vitesses et accélérations. La position désirée des différents points est définie grâce aux postures décrites précédemment ainsi que grâce à l'orientation des pieds du sujet humain par rapport au repère terrestre. Les paramètres nécessaires à la construction de ces trajectoires peuvent être résumés de la façon suivante (pour notre exemple) :

- t_1 : Altitude des orteils du pied gauche, les positions d'un point par pied et orientation des pieds
- t_5 : Altitude maximum du talon du pied en balance
- t_6 : Altitude maximum de l'orteil du pied en balance
- t_7 : Altitude de l'orteil du pied droit, position d'un point et orientation du pied droit

Les trajectoires obtenues peuvent être comparées à celles du sujet (Fig. 5-6). Pour celui-ci uniquement la position de trois marqueurs sont représentés tandis que pour le robot, les quatre points extrêmes des pieds sont contrôlés. Concernant les altitudes (Fig. 5), les trajectoires des talons sont bien reproduites tandis que celles des orteils semblent plus difficiles à reproduire. Il faudrait extraire plus de paramètres pendant les phases de simple appui. La trace des pas sur le sol (Fig. 6), semble être bien reproduite tout en s'adaptant aux dimensions du robot. En effet, le sujet mesurant 1m80 tandis qu'HRP-2 seulement 1m54, les dimensions des pas sont bien sûr diminués. La position de départ est différente puisque l'on impose au robot de partir avec les deux pieds parallèles (position zéro).

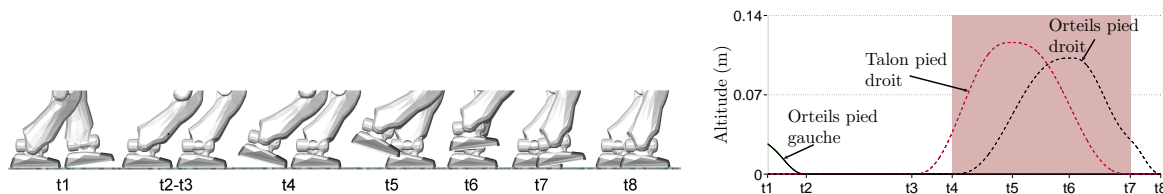


FIG. 4 – Exemple de trajectoires de référence des pieds du robot pendant un pas de marche

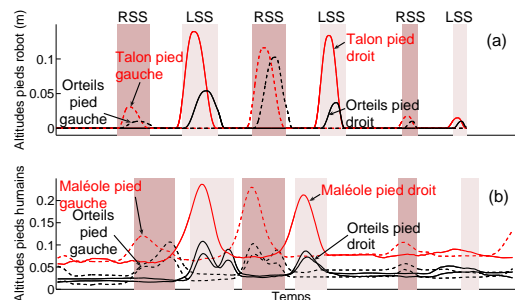


FIG. 5 – Altitudes des orteils et du talon du robot (a) et du sujet humain (b)

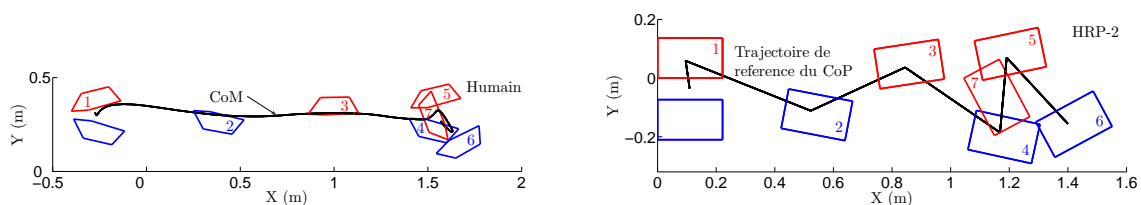


FIG. 6 – Trajectoires des pieds et du CoM du sujet humain et du robot

3.3 Équilibre du robot

Pour assurer l'équilibre du robot la trajectoire du CoP est contrôlée. Le CoP doit rester pour chaque pas de temps dans le polygone de sustentation défini par l'enveloppe des contacts au sol (un ou deux pieds). Pendant les phases de simple appui on impose au CoP de rester dans la semelle en contact avec le sol. Pendant ces phases, soit il progresse le long de la semelle comme constatée chez l'humain (Figure 3) soit il reste immobile. Pour HRP-2, il restera immobile pendant les phases de simple appui (Figure 6, points 1 à 7). En effet, après de nombreux essais sous le logiciel de simulation OPENHRP (General robotics, Inc®), il apparaît que le robot est beaucoup plus stable avec cette contrainte.

Pendant les phases de double appui, le CoP progresse en ligne droite d'un pied d'appui à l'autre. Les deux composantes de la trajectoire du CoP débutent chaque phase de simple et double appui avec une vitesse et une accélération nulles. Comme pour les trajectoires des pieds des polynômes d'ordre 6 sont utilisés. Dans cet article, uniquement des résultats d'optimisation en équilibre quasistatique sont présentés, les trajectoires du CoP et du CoM sont confondus. La méthode de génération de trajectoires de marche dynamique développée par

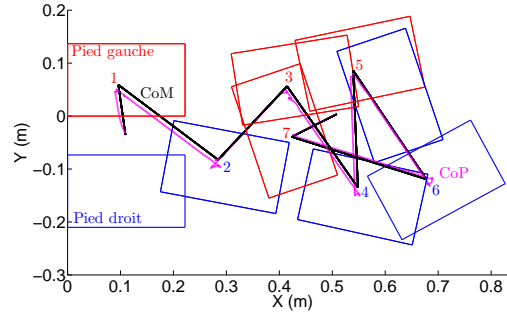


FIG. 7 – Positions des simples appuis du robot avec une diminution de la longueur des pas

Kajita [8] pourrait être utilisée de la même façon. Dans notre exemple on impose au CoM de suivre la trajectoire de référence du CoP. Dans le cas d'une marche dynamique, par une méthode de commande prédictive d'un pendule inversé, on déterminerait tout d'abord la trajectoire du CoM permettant de respecter la trajectoire de référence du CoP. Ensuite on imposerait grâce au modèle géométrique inverse du robot au CoM de suivre cette trajectoire au cours du mouvement.

Avec notre algorithme spécifique d'inversion du modèle géométrique, le CoM du robot est contraint à suivre la trajectoire imposée au CoP. En traçant la trajectoire du CoP (Figure 7), il est possible de trouver la vitesse limite d'exécution du mouvement qui assure sa stabilité. Le mouvement transposé devenant plus lent car répondant au critère d'équilibre quasistatique, la taille des pas est alors diminuée (Figure 7) pour générer une allure de marche compatible avec sa vitesse d'exécution.

3.4 Optimisation

Pour respecter les contraintes d'équilibre et de position des pieds un algorithme d'optimisation est utilisé à chaque pas de temps du mouvement. La méthode amortie des moindres carrés [9] appelée également la méthode Levenberg-Marquardt a été choisie pour sa rapidité et sa robustesse. Pour que les butées articulaires du robot soient respectées un deuxième terme est ajouté à l'équation classique de la cinématique inverse 1. $\nabla\phi$ est le gradient de la fonction contrainte associée aux limites des variables articulaires [10].

A part au premier pas de temps, la procédure d'optimisation commence par la posture calculée au pas précédent et progresse vers la nouvelle posture. La position du robot par rapport au repère terrestre est définie par un point d'un pied considéré comme fixe et par l'orientation du bassin. La tâche (11 contraintes) provient des contraintes suivantes :

- 3 angles d'orientation du pied au sol
- 3+3 paramètres qui définissent l'orientation et la position du pied en balance
- 2 paramètres pour la position axiale et transverse du CoP

$$\Delta q = J^{+\lambda} \Delta x_i + \alpha(I - J^{+\lambda} J_q) \nabla \phi \quad (1)$$

Seulement les douze coordonnées articulaires du système locomoteur sont modifiées par cette optimisation. La partie haute du robot suit les trajectoires articulaires humaines tout en respectant les butées et le critère d'auto-collision. Comme le modèle géométrique, la matrice jacobienne est calculée de façon littérale, par contre la pseudo inverse pondérée est calculée numériquement à chaque pas de temps. La procédure itérative est arrêtée quand la posture respecte suffisamment sa tâche. Pour notre application nous utilisons une précision de $5.10^{-5}m$. Cette valeur semble acceptable vis-à-vis des résultats de simulation sur le logiciel OPENHRP.

4 Application au robot HRP-2

Le mouvement humain obtenu par les marqueurs a été transposé pour le robot humanoïde HRP-2. Le système locomoteur de celui-ci est composé de douze actionneurs, trois par hanche, un par genou et deux par cheville. Pour l'application seulement dix actionneurs sur dix huit sont utilisés pour la partie haute : les degrés de liberté au niveau des poignées, des mains et du cou ne sont pas sollicités. Au total, vingt deux coordonnées articulaires sont générées par le programme de transposition. Les dimensions caractéristiques du robot sont bien différentes du sujet humain ainsi que la masse. L'allure du mouvement transposé est représentée sur la Figure 8. De plus, la Figure 7 présente la trace des pas sur le sol du robot pour cette application. La vitesse de marche moyenne est bien sûr beaucoup plus faible pour le robot que pour le sujet humain. En effet, les membres inférieurs du robot sont plus petits que ceux du sujet mais surtout la marche dynamique mesurée est transformée en marche quasistatique. La vitesse maximum lors de ce mouvement est de l'ordre de 0,30km/h pour le robot alors que l'humain marche à une vitesse maximum de 3,6km/h. Le robot démarre avec des angles de flexion égaux à 20-40-20° pour la cheville, le genou et la hanche. Tous les autres axes démarrent avec un angle nul. La posture à la fin du mouvement est la même. La stabilité du robot a été validée sous le logiciel OPENHRP. L'allure de

marche est originale car durant les phases de double appui le robot utilise les arêtes avant et arrière de ses pieds comme support. De plus elle reproduit non seulement les traces de pas au sol mais aussi les orientations des pieds à plusieurs instants du mouvement. Le robot reproduit une marche en ligne droite puis un virage de plus de 90°.

5 Conclusion

L'approche développée dans cet article a pour objectif de définir un protocole robuste et efficace de transposition d'allure de marche humaine pour les robots humanoïdes. À partir du mouvement humain capturé les trajectoires de référence des pieds et du CoP du robot sont générés ainsi que l'orientation du bassin. Un algorithme de cinématique inverse permet de déterminer les variables articulaires correspondant aux contraintes imposées. Cette méthode sera bientôt utilisée pour d'autres robots humanoïdes de plus petites tailles ainsi que pour générer des marches dynamiques.

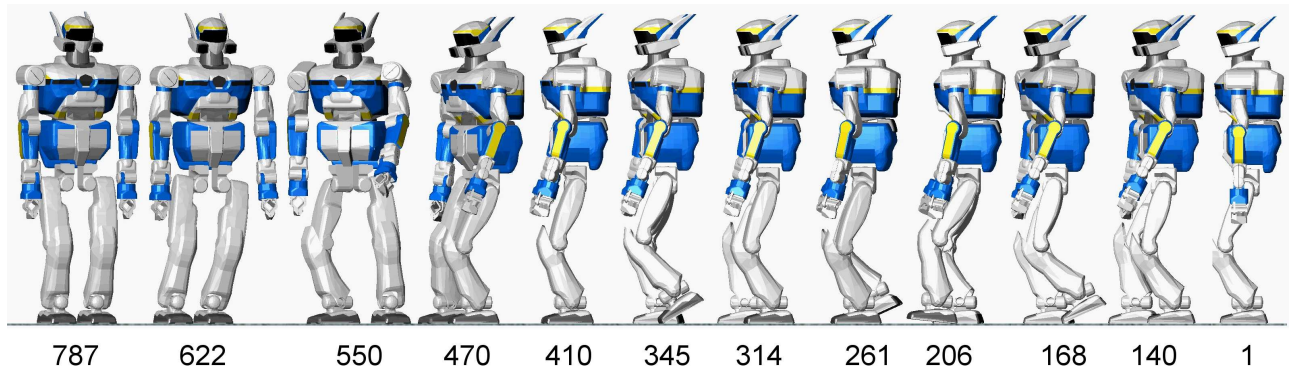


FIG. 8 – Mouvement complet obtenu avec le robot HRP-2 après l'application de la procédure de transposition

6 Remerciements

Ce projet de recherche est financé par le ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche, l'Université de Poitiers et le CNRS. Il fait partie du projet "Images et interactivités" du contrat de plan Etat-Région Poitou-Charentes. De plus, ces travaux interviennent dans le cadre d'une collaboration avec le JRL-France.

Références

- [1] Wu G., Cavanagh P., and Brand R. Isb recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10), 1257–1261, 1995.
- [2] Gleicher M. Retargetting motion to new characters. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pages 33–42, 1998.
- [3] Nakaoka S., Nakazawa A., Kanehiro F., Kaneko K., Morisawa M., Hirukawa H., and Ikeuchi K. Learning from observation paradigm : Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances. *International Journal of Robotics Research*, 26(8), 829–844, 2007.
- [4] Bell A., Pedersen D., and Brand R. A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. *Journal of Biomechanics*, 23(6), 617–621, 1990.
- [5] Monnet T., Desailly E., Begon M., Vallée C., and Lacouture P. Comparison of the score and ha methods for locating in vivo the glenohumeral joint centre. *Journal of Biomechanics*, 40(15), 3487–3492, 2007.
- [6] Desailly E., Daniel Y., Sardain P., and Lacouture P. Foot contact event detection using kinematic data in cerebral palsy children and normal adults gait. *Gait and Posture*, 29(1), 76–80, 2009.
- [7] Rose J. G. J. *Human Walking*. Williams and Wilkins, 1994.
- [8] Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., and Hirukawa H. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '03*, volume 2, pages 1620–1626 vol.2, 2003.
- [9] Wampler C. W. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. 16(1), 93–101, 1986.
- [10] Liegeois A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. 7(12), 868–871, 1977.